

## КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Д. О. МАЛАХАТКА\*, С. О. ПАЛАЧОВ

відділ стабілізації параметрів електромагнітної енергії, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна  
\*e-mail: d.malakhatka@gmail.com

**АНОТАЦІЯ.** В роботі розглянуто умови найбільш ефективного використання розробленого перспективного засобу для вирішення актуальної проблеми комплексного забезпечення електромагнітної сумісності за рахунок одночасного покращення низки показників якості напруги електропостачання (за гармоніками, несиметрією та коливанням рівня напруги) в сучасних розподільних електричних мережах загального призначення. Запропоновано імітаційну модель трифазної чотирипровідної розподільної мережі, яка дозволяє оцінити показники якості напруги електропостачання при підключенні до неї нелінійних та несиметричних навантажень. Проведено імітаційне моделювання режимів роботи зазначеної мережі з певними характеристиками, при різних значеннях потужностей одно- та трифазного нелінійного навантаження у вигляді мережеских випрямлячів. Результати моделювання трифазної електричної мережі зі стандартним характером розподільного обладнання в розподільній мережі недостатньо наявності у кожній окремій одиниці зазначеного обладнання вбудованого індивідуального засобу зниження емісії завад, який забезпечує відповідність вимогам європейських гармонізованих стандартів з електромагнітної сумісності. Тому для вирішення вказаної проблеми в зазначених мережах запропоновано для споживачів додатково застосовувати групові засоби забезпечення електромагнітної сумісності, а саме гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі, що поєднують в собі функціональні можливості регульованого фільтросиметруючого пристрою на базі автотрансформатора зі з'єднанням обмоток у зиг-заг та активного паралельного силового фільтра. Аналіз результатів імітаційного моделювання трифазної електричної мережі зі стандартним характером розподільного трансформатора дозволив визначити відношення потужностей одно- та трифазного нелінійного навантаження споживачів та рівні несиметрії лінійного навантаження в мережі, при яких розроблений гібридний фільтрокомпенсуючий перетворювач має перевагу над відомими пасивними груповими засобами покращення показників якості напруги і дозволяє забезпечити якість напруги відповідно до норм діючих міжнародних стандартів.

**Ключевые слова:** електромагнітна сумісність; якість напруги; гібридний фільтрокомпенсуючий перетворювач; активний силовий фільтр; регульований фільтросиметруючий пристрій; розподільна мережа.

## COMPREHENSIVE PROVISION OF STANDARD POWER QUALITY PARAMETERS IN THREE-PHASE NETWORKS BY THE USE OF HYBRID FILTER-COMPENSATING CONVERTERS

D. MALAKHATKA\*, S. PALACHOV

Department of stabilization of electromagnetic energy parameters, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**ABSTRACT.** In this work the conditions of the most effective use of the developed perspective means for the solution of the actual problem of complex providing of electromagnetic compatibility in modern distribution public electricity networks are considered. This is achieved by improvement of a number of voltage quality characteristics (harmonics, asymmetry and voltage fluctuations). The simulation model of a three-phase four-wire distribution network is proposed, which allows estimating voltage quality characteristics when connecting non-linear and asymmetric loads. The simulation modeling of the operation of the specified network with certain characteristics, with different values of the power of single- and three-phase nonlinear load (rectifiers) is carried out. The simulation results showed that in modern conditions, with a high concentration of electronic equipment in the distribution network, it is not enough for each separate unit of equipment to have a built-in individual means for reducing the emission of disturbances, which ensures compliance with the requirements of the European Harmonized Standards for Electromagnetic Compatibility. Therefore, in order to solve this problem in the electricity networks it is suggested for consumers to additionally apply group electromagnetic compatibility means, including hybrid filter-compensating converters that combine functional capabilities of a regulated filter balancing device which based on an autotransformer with the zig-zag connection of windings and an active parallel power filter. The analysis of simulation results of a three-phase electric network with standard characteristics of a distribution transformer allowed to determine the ratio of power of one- and three-phase nonlinear load of consumers and linear load asymmetries in network, for which a hybrid filter-compensating converter has an advantage over the known passive group means of improving the quality of voltage and allows you to provide the quality of voltage in accordance with the norms of the international standards.

**Keywords:** electromagnetic compatibility; voltage quality; hybrid filter-compensating converter; active power filter; regulated balancing filter device; distribution network.

© Д. О. Малахатка, С. О. Палачов, 2019

## Вступ

Забезпечення електромагнітної сумісності і нормованих показників якості напруги за гармоніками, несиметрією напруг та коливанням рівня напруги в сучасних трифазних чотирипровідних розподільних електричних мережах будівель житлового та комерційного призначення є важливою і достатньо складною задачею внаслідок декількох причин.

По-перше, в зазначених мережах є велика кількість споживачів договірної потужності навантаження яких є відносно малою, тому вони використовують однофазне приєднання до низьковольтної мережі. Такі споживачі не зобов'язані координувати добовий графік роботи свого обладнання між собою внаслідок чого в таких мережах можуть мати місце значні коливання в часі струмів навантаження по різних фазам, що спричиняє погіршення показників рівня напруги електро-постачання та несиметрії напруг.

По - друге, в якості навантаження споживачів в таких мережах широко використовується сучасне електронне обладнання, в тому числі частотні перетворювачі для електродвигунів змінного струму, які мають блоки живлення з мережевими випрямлячами, форма споживаного струму яких суттєво відрізняється від синусоїди, внаслідок чого спотворюється форма напруги електропостачання, а показники якості електроенергії по гармонікам напруги погіршуються.

По - третє, норми європейських гармонізованих стандартів, що встановлюють обов'язкові граничні рівні з емісії завад для кожної окремої одиниці обладнання, розраховані для умов стандартного електромагнітного оточення при певних припущеннях, які засновані на стандартному імпедансі мережі, певних імовірнісних характеристиках одночасної роботи обмеженої кількості обладнання тощо. Крім того під час розробки зазначених норм враховувалася можливість забезпечення їх перш за все простими і дешевими засобами, наприклад, пасивними коректорами коефіцієнта потужності у вигляді 2,5% дроселів змінного струму.

Однак параметри розподільних трансформаторів та графіки роботи і характеристики навантаження в реальних мережах можуть суттєво відрізнятися від умов стандартного електромагнітного оточення. Тому для забезпечення електромагнітної сумісності в таких мережах важливо також забезпечити граничний рівень емісії завад від всього обладнання в даній мережі [1], для чого слід використовувати різні типи групових засобів забезпечення електромагнітної сумісності. Найбільш оптимальний тип групового засобу для кожної конкретної мережі має бути визначеним в залежності від її характеристик та особливостей навантаження, що приєднано до неї.

## Мета роботи

Визначення умов найбільш ефективного використання розробленого перспективного групового

засобу комплексного забезпечення електромагнітної сумісності та показників якості напруги в трифазних чотирипровідних мережах з нелінійним та несиметричним навантаженням.

## Виклад основного матеріалу

Порівняльний аналіз принципів побудови напівпровідникових перетворювачів електроенергії та особливостей їх застосування в трифазних системах для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення ЕМС дозволив визначити перспективний клас перетворювальних пристроїв, які дозволяють комплексно вирішити цю проблему шляхом одночасного дотримання регламентованих міжнародними стандартами рівнів таких параметрів якості електроенергії, як несинусоїдальність напруг та струмів, несиметрія напруг за нульовою послідовністю, а також відхилення та коливання рівня фазних напруг [2, 3]. Перспективним засобом забезпечення ЕМС в трифазних чотирипровідних системах є гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі (ГФКП), які побудовано на основі фільтру струмів нульової послідовності та напів-провідникових компенсуючих перетворювачів [4-6].

Запропонований ГФКП (рис.1) поєднує в собі функціональні можливості регульованого фільтросиметруючого пристрою (РФСП) на базі автотрансформатора зі з'єднанням обмоток у зиг-заг та активного паралельного силового фільтра (АПФ).

Регульований фільтросиметруючий пристрій здійснює ефективну фільтрацію непарних вищих гармонік, які кратні трьом, і параметричне усунення несиметрії та коливань напруги навантаження. За допомогою трифазного комутатора ступенів регулювання напруги (ключі К1-К12) РФСП забезпечує трирівневе симетричне регулювання рівнів

напруги навантаження, тобто режими «вольто-віднімання», «номінал» та «вольтододавання». Додаткову компенсацію вищих гармонік струму в системі здійснює активний паралельний силовий фільтр. На рис.1 введено такі основні позначення: ФВГ1-ФВГ3 – фільтри вищих гармонік; Р1-Р3 – послідовні мережеві реактори зв'язку; С1-С2 – конденсаторні батареї; РФСП – регульований фільтросиметруючий пристрій; АПФ – активний паралельний фільтр.

Загальну систему керування, що забезпечує одночасну ефективну роботу обох складових ГФКП приведено на рис.2. Складову систему керування активним силовим фільтром побудовано на основі використання модифікованої  $p-q$  теорії та стратегії «синусоїдальних струмів» [7-9], яка є достатньо ефективною у випадку, коли АПФ застосовується для зменшення гармонічних спотворень напруги мережі.

Фазні напруги з боку підключення навантаження містять в основному складові прямої послідовності, але в той же час можуть бути несиметричними (при наявності складових зворотної та нульової послідовностей на основній частоті) і містити вищі гар-

моніки. Тому при обчисленні опорних струмів АПФ можуть виникати помилки алгоритму керування. Виділення складових прямої послідовності фазних напруг проводиться за допомогою «детектора напруг прямої послідовності».

Важливою складовою такого детектора є блок фазового автоналаштування частоти (ФАНЧ), за допомогою якого в режимі реального часу відслідкову-

ється основна частота напруг та генеруються опорні сигнали синусоїдальної форми. Використання блоку ФАНЧ, у складі детектора прямої послідовності за напругою дозволяє уникнути помилок, які виникають за умов, коли напруги в мережі є значно спотвореними [7, 10-12].

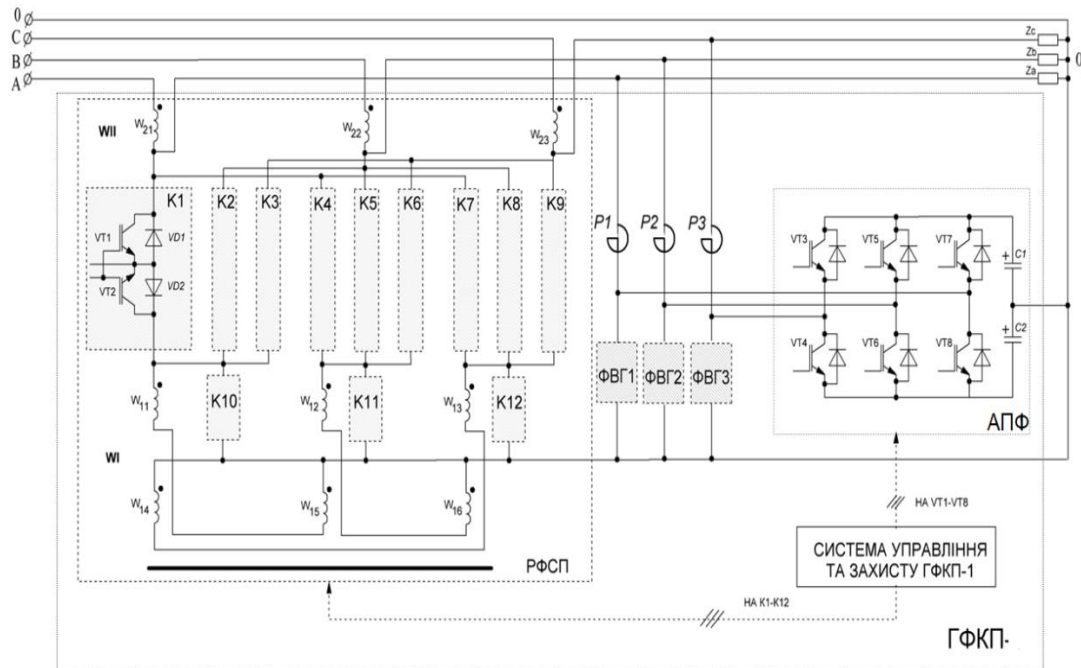


Рис. 1 – Схема гібридного фільтрокомпенсуючого перетворювача

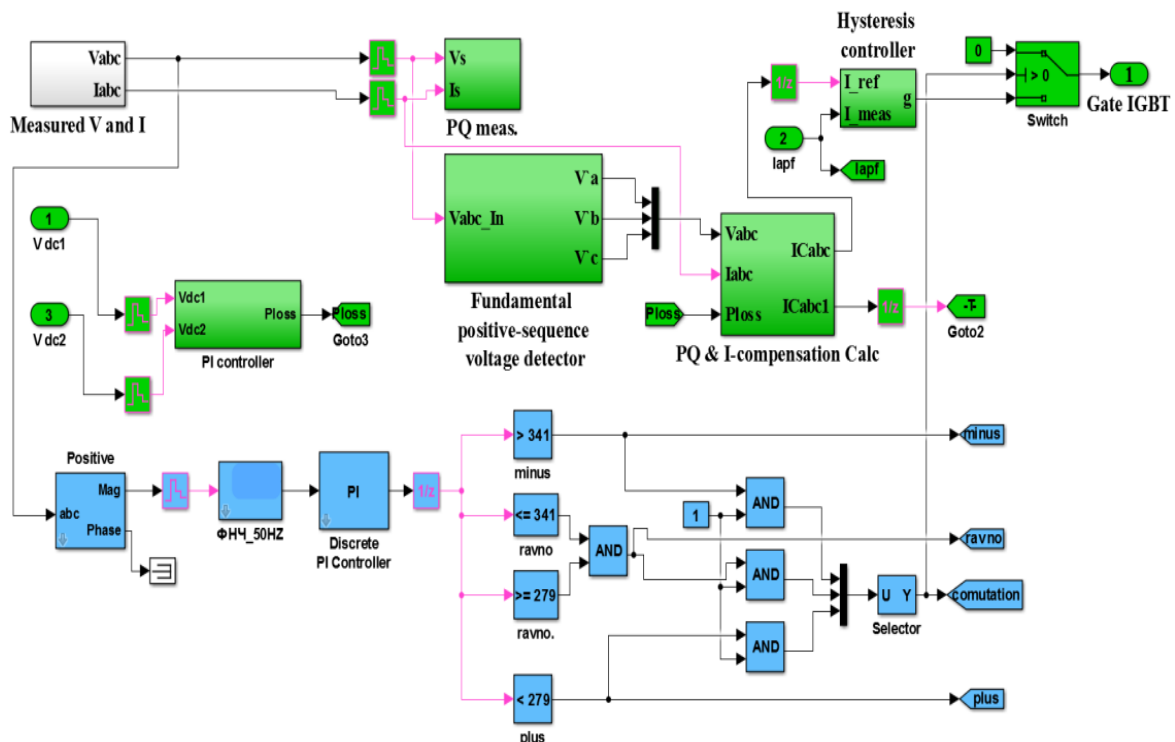


Рис. 2 – Система управління гібридним фільтрокомпенсуючим перетворювачем

Запропоновано імітаційну модель трифазної чотирьохпроводної розподільної мережі, яка дозволяє оцінити показники якості напруги електропостачання при підключенні до неї нелінійних та несиметричних навантажень (рис.3). Основні параметри трифазної чотирьохпроводної мережі: силовий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка-зірка з нулем» потужністю 250 кВА. (параметри симетричних складових –  $R_{\text{пр}}=0.01$  Ом,  $L_{\text{пр}}=89 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R_{\text{нул.}}=0.0965$  Ом,  $L_{\text{нул.}}=748 \cdot 10^{-6}$  Гн, ); значення параметрів провідників лінії 1 і лінії 2 –  $R=0.0124$  Ом;  $L=19 \cdot 10^{-6}$  Гн; нульового проводу –  $R=0.025$  Ом;  $L=7.63 \cdot 10^{-6}$  Гн.

Несиметричне трифазне RL-навантаження ( $\cos \varphi = 0.9$ ) потужністю 110 кВА складається з трьох однофазних  $S_A=47$  кВА,  $S_B=54$  кВА,  $S_C=9$  кВА. Група однофазного обладнання класу D (згідно з класифікацією стандарту ДСТУ ІЕС 61000-3-2), що симетрично приєднано до трьох фаз мережі, представлена у вигляді декількох еквівалентних випрямлячів активною потужністю 3,5 кВт; а трифазного обладнання – у вигляді певної кількості трифазних випрямлячів активною потужністю 10,5 кВт. В якості навантаження випрямлячів використовується блок джерела струму, що керується напругою. Це дозволяє отримати незмінне значення потужності нелінійного навантаження у ви-

падку зміни напруги на вході випрямляча [13]. Кожна схема заміщення еквівалентного одно- та трифазного випрямляча містить в своєму складі пасивний коректор коефіцієнту потужності, у вигляді 2,5% дроселя змінного струму, завдяки якому рівень емісії гармонік струму знаходиться в межах, що визначені міжнародними гармонізованими стандартами з ЕМС [14].

Моделювання проводилось в чотирьох режимах, які характеризуються незмінним значенням загальної потужності нелінійного навантаження 136,5 кВт але різним співвідношенням кількості трифазних та еквівалентних однофазних випрямлячів. Для зручності характеристики зазначеного розподілу потужності нелінійного навантаження між трифазним та однофазним обладнанням було введено коефіцієнт розподілу нелінійного навантаження  $K_{\text{РНН}}$ , який розраховується як відношення сумарної активної потужності трифазних випрямлячів ( $P_{\text{три.вип}}$ ) до сумарної активної потужності однофазних випрямлячів ( $P_{\text{од.вип}}$ ). В режимі 1  $P_{\text{три.вип}}=105$  кВт,  $P_{\text{од.вип}}=31,5$  кВт,  $K_{\text{РНН}}=3,3$ ; в режимі 2  $P_{\text{три.вип}}=94,5$  кВт,  $P_{\text{од.вип}}=42$  кВт,  $K_{\text{РНН}}=2,3$ ; в режимі 3  $P_{\text{три.вип}}=84$  кВт,  $P_{\text{од.вип}}=52,5$  кВт,  $K_{\text{РНН}}=1,6$ ; в режимі 4  $P_{\text{три.вип}}=73,5$  кВт,  $P_{\text{од.вип}}=63$  кВт,  $K_{\text{РНН}}=1,2$ .

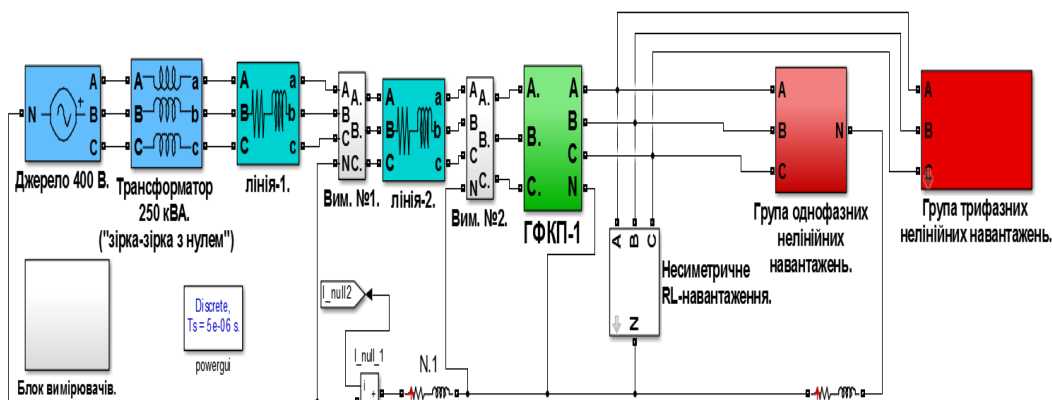


Рис. 3 – Імітаційна модель ГФКП в пакеті Matlab "Simulink"

### Результати досліджень

В результаті проведеного імітаційного моделювання електричної мережі з чотирма режимами нелінійного навантаження було розраховано показники якості напруги у випадку відсутності групового засобу покращення ЕМС, з застосуванням тільки РФСП та при застосуванні повної структури ГФКП. Вимірювання проводились в точці «Вим. №2» (рис.3).

Отримано залежності зміни величини сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень (СКГС) напруги, третьої ( $K_U(3)$ ) та п'ятої ( $K_U(5)$ ) гармонік напруги, а також коефіцієнту несиметрії напруг за нульовою послідовністю ( $K_{0U}$ ) від зміни величини коефіцієнту розподілу нелінійного навантаження ( $K_{\text{РНН}}$ ).

Результати моделювання показали, що на вибір групового засобу забезпечення ЕМС в розподільній мережі зі значною кількістю електронного обладнан-

ня важливу роль має не тільки величина загальної потужності нелінійного навантаження, але й розподіл зазначеної потужності між обладнанням з однофазними та трифазними випрямлячами, що впливає на рівень домінуючих рівень третьої, п'ятої, сьомої гармонік струму.

Так, наприклад у розглянутому випадку, коли  $P_{\text{три.вип}}$  в два рази перевищує  $P_{\text{од.вип}}$ , то застосування лише РФСП не дозволяє зменшити значення СКГС напруги електропостачання до норми, що встановлено міжнародним стандартом ДСТУ EN50160 (рис.4), а також не дозволяє забезпечити дотримання рівня 5-ї гармоніки (рис.6) [3]. Проте застосування запропонованого ГФКП дозволяє забезпечити дотримання вимог, що ставляться до величини гармонічних спотворень напруги в мережі. Слід відмітити, що застосування ГФКП також призводить до суттєвого зменшення несиметрії напруг в мережі, і як наслідок  $K_{0U}$

знаходиться в межах норми, що визначена діючим на сьогодні стандартом ГОСТ 13109-97 (рис.7) [2].

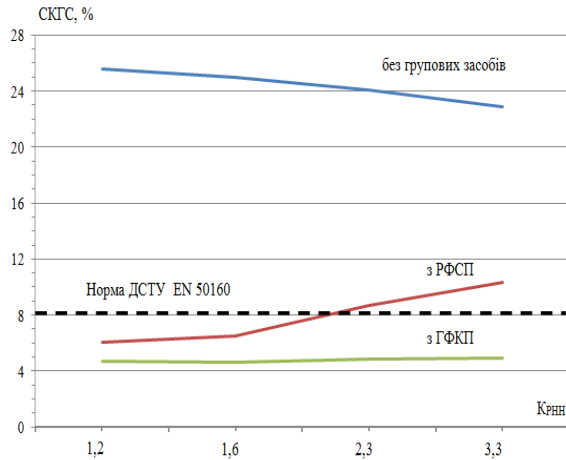


Рис. 4 – Залежність зміни величини СКГС напруги від коефіцієнту  $K_{RHH}$

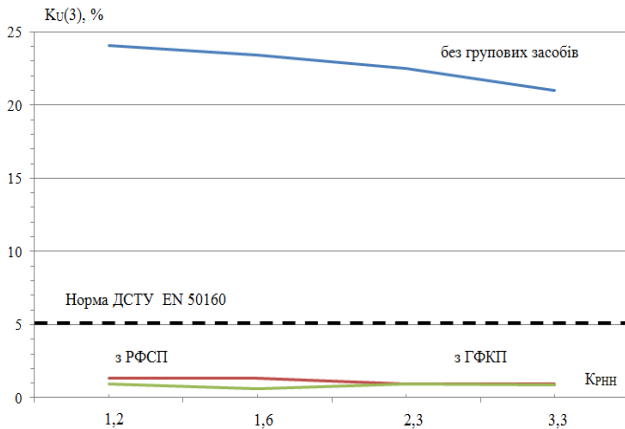


Рис. 5 – Залежність зміни величини третьої гармоніки напруги від коефіцієнту  $K_{RHH}$

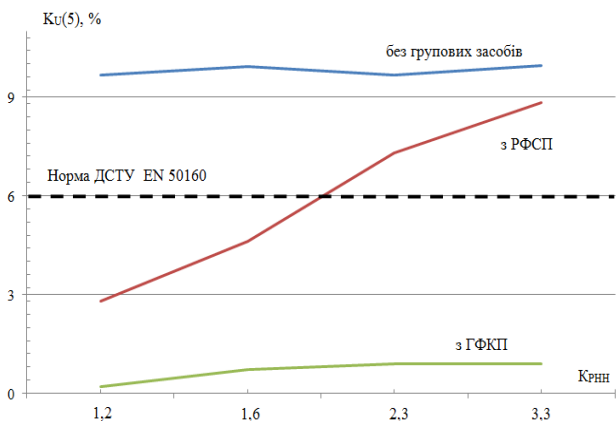


Рис. 6 – Залежність зміни величини п'ятої гармоніки напруги від коефіцієнту  $K_{RHH}$

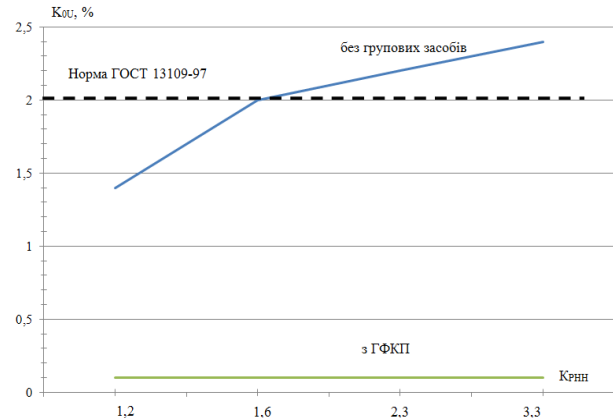


Рис. 7 – Залежність зміни коефіцієнту  $K_{0U}$  від коефіцієнту  $K_{RHH}$

## Висновки

1. Використання запропонованої імітаційної моделі трифазної чотирипровідної системи дозволило оцінити показники якості напруги електропостачання (за гармоніками, несиметрією напруг та коливанням рівня напруги) в умовах одночасної роботи групи нелінійних та несиметричних навантажень.

2. Визначено, що у випадку приєднання до електричної мережі нелінійного навантаження певної потужності, застосування індивідуальних засобів зниження рівня емісії завад в кожній окремій одиниці обладнання (відповідно до вимог гармонізованих стандартів з ЕМС) не є достатньою умовою забезпечення нормованих показників якості напруги в електричній мережі. В цьому разі необхідно додатково застосовувати групові засоби забезпечення ЕМС.

3. Визначено, що існує певне відношення рівнів потужності трифазного і однофазного нелінійного навантаження, при якому для комплексного вирішення задачі забезпечення якості напруги електропостачання в якості групового засобу забезпечення ЕМС припустимо застосування регульованого фільтросиметруючого пристрою. Показано, що при перевищенні зазначеного рівня треба застосовувати гібридний фільтрокомпенсуючий перетворювач.

## Список літератури

1. **ІЕС 61000-3-14:2011.** Electromagnetic compatibility (EMC). - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems.
2. **ГОСТ 13109-97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. в Украине 01.01.2000. (Межгосударственный стандарт стран СНГ). К: ИПК Изд-во стандартов, 1999.
3. **ДСТУ EN 50160:2014** Характеристики напруги електропостачання у в електричних мережах загальної при-

- наченості. Держспоживстандарт України. 2014. 27 с.
4. **Малахатка Д. О.** Силові схеми гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями / *Праці ІЕД НАН України*. – 2016. – №45. – С. 92–101.
  5. **Жаркін А. Ф.** Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями / **А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, Д. О. Малахатка** // *Технічна електро-динаміка*. – 2015. – №4. – С. 48–52.
  6. **Singh B.** Reduced Rating VSC With a Zig-Zag Transformer for Current Compensation in a Three-Phase Four-Wire Distribution System / **B. Singh B. P. Jayaprakash** // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2008. – pp. 249–259. doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005398
  7. **Akagi H.** Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Second edition. / **Akagi H., Hirokazu W., Aredes M** // *IEEE Press: Wiley*. – 2017. – 431 p. – doi:10.1002/9781119307181.
  8. **Patnaik N.** Comparative analysis on a shunt active power filter with different control strategies for composite loads / **N. Patnaik, A. K. Panda** // *TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference*. – Jan. 2015. doi: 10.1109/TENCON.2014.7022289
  9. **Herrera R. S.** Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches assessment and experimental results / **R. S. Herrera, P. Salmeron, H. Kim** // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Jan. 2008. – vol. 55. – no. 1. – pp. 184–196. doi:10.1109/TIE.2007.905959
  10. **Samal S.** Harmonics mitigation by using shunt active power filter under different load condition / **S. Samal S., K. Hota, K. Barik** // *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. – 2016. – pp. 94–98. doi: 10.1109/SCOPES.2016.7955598
  11. **Young C. M.** Selective harmonic elimination in multi-level inverter with zig-zag connection transformers. / **C. M. Young, Z.F. Wu** // *The Institution of Engineering and Technology*. – 2014. – Vol 4. – pp. 876–885.
  12. **Tali M.** Harmonic detection methods of Shunt Active Power Filter under unbalanced loads / **M. Tali, A. Essadki, N. Nasser** // *International Renewable and Sustainable Energy Conference*. – 2016. – pp. 1017–1023. doi: 10.1109/IRSEC.2016.7984003
  13. **Жаркин А. Ф.** Особенности расчета гармоник напряжения в сетях низкого напряжения Украины с нелинейной выпрямительной нагрузкой / **А. Ф., Жаркин, С. А., Палачов** // *Технічна динаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. – 2014. – Ч4. – С. 117–122.
  14. **Жаркін А. Ф.** Аналіз ефективності застосування пасивних фільтрових коригувальних пристроїв в низьковольтних електричних мережах України / **А. Ф., Жаркін, С. О., Палачов, Т. Б. Шкляр** // *Енергосбереження. Енергетика. енергоаудит*. – 2014. – №9(128). – С. 153–160.

## References (transliterated)

1. **IEC 61000-3-14:2011.** Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems.
2. **GOST 13109-97.** Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normyi kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Vved. v Ukraine 01.01.2000. (Mezhgosudarstvennyy standart stran SNG). K: IPK Izd-vo standartov, 1999.
3. **DSTU EN 50160:2014** Kharakterystyky napruhy elektropostachannia u v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachennosti. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. 2014.
4. **Malakhata D. O.** Sylovi skhemy hibrydnykh filtrokompensuiuchykh peretvoriuvachiv dlia tryfaznykh system z neliniinymy ta zminnymy navantazhenniamy / *Pratsi IED NAN Ukrainy*. – 2016. – №45. – pp. 92–101.
5. **Zharkin A. F.** Hibrydni filtrokompensuiuchi peretvoriuvachi dlia tryfaznykh system z neliniinymy ta zminnymy navantazhenniamy / **A. F. Zharkin, V. O. Novskiy, D. O. Malakhata** // *Tekhnichna elektro-dynamika*. – 2015. – №4. – pp. 48–52.
6. **Singh B.** Reduced Rating VSC With a Zig-Zag Transformer for Current Compensation in a Three-Phase Four-Wire Distribution System / **B. Singh B. P. Jayaprakash** // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2008. – pp. 249–259. doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005398
7. **Akagi H.** Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Second edition. / **Akagi H., Hirokazu W., Aredes M** // *IEEE Press: Wiley*. – 2017. – 431 p. – doi:10.1002/9781119307181.
8. **Patnaik N.** Comparative analysis on a shunt active power filter with different control strategies for composite loads / **N. Patnaik, A. K. Panda** // *TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference*. – Jan. 2015. doi: 10.1109/TENCON.2014.7022289
9. **Herrera R. S.** Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches assessment and experimental results / **R. S. Herrera, P. Salmeron, H. Kim** // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Jan. 2008. – vol. 55. – no. 1. – pp. 184–196. doi:10.1109/TIE.2007.905959
10. **Samal S.** Harmonics mitigation by using shunt active power filter under different load condition / **S. Samal S., K. Hota, K. Barik** // *Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. – 2016. – pp. 94–98. doi: 10.1109/SCOPES.2016.7955598
11. **Young C. M.** Selective harmonic elimination in multi-level inverter with zig-zag connection transformers. / **C. M. Young, Z.F. Wu** // *The Institution of Engineering and Technology*. – 2014. – Vol 4. – pp. 876–885.
12. **Tali M.** Harmonic detection methods of Shunt Active Power Filter under unbalanced loads / **M. Tali, A. Essadki, N. Nasser** // *International Renewable and Sustainable Energy*



- Conference. – 2016. – pp. 1017–1023. doi: 10.1109/IRSEC.2016.7984003
13. **Zharkin A. F.** Analiz efektyvnosti zastosuvannya pasyvykh filtrovykh koryhuvalnykh prystroiv v nyzkovoltnykh elektrychnykh merezhakh Ukrainy / **A. F., Zharkin, S. O., Palachov** // Energoberezhennye. Energetika. energoaudit. – 2014. – №9(128). – pp. 153–160.
14. **Zharkin A. F.** Analiz efektyvnosti zastosuvannya pasyvykh filtrovykh koryhuvalnykh prystroiv v nyzkovoltnykh elektrychnykh merezhakh Ukrainy / **A. F., Zharkin, S. O., Palachov, T. B. Shklier** // Energoberezhennye. Energetika. energoaudit. – 2014. – №9(128). – pp. 153–160.

#### Інформація про авторів (About authors)

**Малахатка Денис Олександрович** – кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки НАН України, науковий співробітник відділу стабілізації параметрів електромагнітної енергії; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-0515-5450; e-mail: d.malakhatka@gmail.com

**Denys Malakhata** – Ph. D., Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, researcher, Department of stabilization of electromagnetic energy parameters, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0515-5450; e-mail: d.malakhatka@gmail.com

**Палачов Сергій Олександрович** – кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки НАН України, старший науковий співробітник відділу стабілізації параметрів електромагнітної енергії; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-4502-1724; e-mail: palp@ukr.net

**Sergiy Palachov** – Ph. D., Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher, Department of stabilization of electromagnetic energy parameters, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4502-1724; e-mail: palp@ukr.net

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Малахатка, Д. О.** Комплексне забезпечення нормованих показників якості напруги електропостачання в трифазних мережах на основі застосування гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів / **Д. О. Малахатка, С. О. Палачов** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 133-139. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.19.

*Please cite this article as:*

**Malakhata, D., Palachov, S.** Comprehensive provision of standard power quality parameters in three-phase networks by the use of hybrid filter-compensating converters. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 133-139, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.19.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Малахатка, Д. О.** Комплексное обеспечение стандартных показателей качества напряжения электроснабжения в трехфазных сетях на основе применения гибридных фильтрокомпенсирующих преобразователей / **Д. О. Малахатка, С. О. Палачов** // Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 133-139. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.19.

**АННОТАЦІЯ.** В роботі розглянуті умови найбільш ефективного використання розробленого перспективного засобу для рішення актуальної проблеми комплексного забезпечення електромагнітної сумісності за счет одночасного удосконалення ряду показників якості напруги електропостачання (по гармонікам, несиметрії та коефіцієнту рівня напруги) в сучасних розподільних електричних мережах загального призначення. Предложено імітаційна модель трьохфазної чотирьохпровідної розподільної мережі, яка дозволяє оцінити показники якості напруги електропостачання при підключенні до неї нелінійних та несиметричних навантажень. Проведено імітаційне моделювання режимів роботи вказаної мережі з певними характеристиками, при різних значеннях потужностей одно- та трьохфазної нелінійної навантаження в вигляді мережних випрямачів. Результати моделювання показали, що в сучасних умовах при великій концентрації електронного обладнання в розподільній мережі недостатньо наявності в кожній окремій одиниці вказаного обладнання вбудованого індивідуального засобу зниження емісії шумів, який забезпечує відповідність вимогам європейських гармонізованих стандартів по електромагнітній сумісності. Тому для рішення даної проблеми в вказаних мережах запропоновано для споживачів додатково застосовувати групові засоби забезпечення електромагнітної сумісності, а саме гібридні фільтрокомпенсируючі перетворювачі, що поєднують в собі функціональні можливості регульованого фільтросиметруючого пристрою на базі автотрансформатора з з'єднанням обмоток в зиг-заг та активного паралельного силового фільтра. Аналіз результатів імітаційного моделювання трьохфазної електричної мережі з стандартними характеристиками розподільного трансформатора дозволив визначити співвідношення потужностей одно- та трьохфазного нелінійного навантаження споживачів та рівень несиметрії лінійної навантаження в мережі, при яких розроблений гібридний фільтрокомпенсируючий перетворювач має перевагу перед відомими пасивними груповими засобами удосконалення показників якості напруги та дозволяє забезпечити якість напруги в відповідності з нормами діючих міжнародних стандартів.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність; якість напруги; гібридний фільтрокомпенсируючий перетворювач; активний силовий фільтр; регульоване фільтросиметруюче пристрій; розподільна мережа.

Надійшла (received) 12.07.2019